

横向来流对等离子体点火器射流特性的影响

赵志宇¹, 张伟嘉², 何立明¹, 刘雄¹, 赵兵兵¹, 雷健平¹, 费力¹

(1. 空军工程大学飞行器与动力工程系, 西安, 710038; 2. 西华大学计算机与软件工程学院, 成都, 610039)

摘要 为研究航空等离子体点火器的射流特性,采用纹影摄像技术记录了等离子体射流的形成及发展过程,研究来流环境下横向来流速度对航空等离子体点火器射流特性的影响规律。结果表明:在横向来流条件下,来流速度的增大会使得射流偏转角增大,当横向来流速度 $v_m=5$ m/s时,射流偏转角 $\theta=15.9^\circ$,当横向来流速度 $v_m=20$ m/s时,射流偏转角 $\theta=77.1^\circ$,来流速度增大15 m/s,射流偏转角增大3.8倍;同时来流速度增大时,会加大等离子体射流动量与热量的损失速率,导致等离子体射流穿透深度、射流速度、射流面积及射流面积变化率均减小。

关键词 横向来流速度;射流特性;等离子体点火器;纹影摄像

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2021.05.004

中图分类号 V231.2 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2021)05-0023-07

Study of Influence of Transverse Flow on Jet Characteristics of Plasma Igniter

ZHAO Zhiyu¹, ZHANG Weijia², HE Liming¹, LIU Xiong¹, ZHAO Bingbing¹, LEI Jianping¹, FEI Li¹
(1. Aircraft and Power Engineering Department, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;
2. Schol of computer and Software Engineerzng, Xihua University, Chengdu 610039, China)

Abstract In order to study the jet characteristics of airborne plasma igniter, the formation and development process of plasma jet is recorded by schlieren camera technology, and the influence of the transverse inflow velocity on the jet characteristics of airborne plasma igniter is studied. The results show that under condition of the transverse inflow, the increase of the incoming flow velocity makes the deflection angle of the jet great. When the transverse inflow velocity $V_m=5$ m/s, the efflux Angle $\theta=15.9^\circ$; when the transverse inflow velocity $V_m=20$ m/s, the efflux Angle $\theta=77.1^\circ$; when the inflow velocity increases by 15 m/s, the efflux Angle increases by 3.8 times. At the same time, when the incoming flow velocity increases, the loss rate of plasma jet momentum and heat increase, resulting in the decrease of plasma jet penetration depth, jet velocity, jet area and jet area change rate.

Key words transverse incoming flow velocity; jet characteristics; airborne plasma igniter; schlieren cinematography

收稿日期: 2020-12-29

作者简介: 赵志宇(1996—),男,河北邯郸人,硕士生,研究方向:等离子体点火技术。E-mail:zhao7358021@163.com

通信作者: 何立明(1959—),男,浙江上虞人,教授,博士生导师,研究方向:等离子体强化燃烧,脉冲爆震发动机和新型冷却技术。E-mail:heliming369@163.com

引用格式: 赵志宇, 张伟嘉, 何立明, 等. 横向来流对等离子体点火器射流特性的影响[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2021, 22(5): 23-29. ZHAO Zhiyu, ZHANG Weijia, HE Liming, et al. Study on the influence of transverse flow on the jet characteristics of plasma igniter [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2021, 22(5): 23-29.

随着飞机飞行包线的不断扩展,航空发动机燃烧室的点火条件愈加恶劣,一旦飞机在高空或高速飞行过程中发生熄火,则很难再次点燃^[1]。对于航空发动机而言,在飞行包线内实现快速、有效、稳定的点火是最基本的设计要求之一^[2]。近年来,等离子体被称为物质存在的第四态^[3],受到了国内外学者的高度关注,其本身所具有的热效应、动力效应和输运效应^[4],可以应用到燃烧室点火之中。根据点火器结构和放电形式的不同,目前主要的等离子体点火方式有等离子体射流点火、滑动弧等离子体点火和激光诱导等离子体点火^[5-7]等。其中等离子体射流点火技术中电弧击穿工作介质气体来流产生等离子体,相比航空发动机传统的电火花点火方式,等离子体射流点火方式具有点火能量大、射流温度高、穿透能力强等优点,能有效缩短点火延迟时间^[8-10],扩大贫/富油点火边界,提高点火的快速性、有效性和可靠性,对于提高航空发动机的性能具有重要意义。

目前,国内外专家学者对等离子体射流点火技术进行了大量的研究。国外方面,Mun Seok Choe等^[11]研究了定容燃烧室环境下等离子体射流对燃烧过程的影响,研究发现等离子体射流在燃烧扩散方面具有优势。Walsh J L等^[12]利用高速摄影技术研究了大气压环境下等离子体射流的点火和传播,研究发现放电总是在电极边缘触发,等离子体的传播机制随外加电压极性的不同而明显不同。国内方面,唐井峰等^[13]在超声速燃烧室中进行等离子体射流点火实验,实验表明等离子体点火器可以在点火起动的不同环境压力下保持稳定工作,并可以实现稳定的超音速燃烧。蒋陆昀等^[14]设计了一种预燃式等离子体射流点火器并对其放电特性和射流特性进行了研究,结果表明预燃式等离子体射流点火器在提升射流能量降低电源功率方面有较大优势。何立明等^[15]对等离子体射流点火的动力学机理进行了分析,研究表明O原子、H原子、CH基能显著缩短煤油/空气混合气的点火延迟时间。

本文对自行设计的等离子体射流点火器进行了实验研究,采用纹影摄像技术记录了等离子体射流的发展过程,研究来流环境下横向来流速度对航空等离子体点火器射流特性的影响规律。研究结果对掌握等离子体射流点火器的工作特性及其调控规律具有指导意义,为等离子体射流点火器在航空发动机上的工程应用提供理论支撑。

1 实验装置及测量方法

1.1 等离子体射流纹影实验系统

本文设计的实验系统由三部分组成,分别是供

气系统、供电系统和纹影测试系统,如图1所示。供气系统中由变频式螺杆空气压缩机(BK22-8G)将空气压缩并储存到压力容器之中,空气经过干燥器之后由一台D08-1F型质量流量控制器控制流量。等离子体射流点火器所使用的电源为课题组前期研制的直流等离子体点火驱动电源,驱动电源的击穿电压为10 kV,输出电流可调,调节范围为20~40 A,驱动电源正极为高压端,接点火器铜质阴极安装座,负极接不锈钢外壳。纹影测试系统为平行光反射式纹影系统,由氙光灯、孔板、凹面镜、刀口、高速CCD相机、计算机、示波器、电压探针、电流探针以及方形有机玻璃实验段等组成,氙光灯作为稳定光源,发出的光经过孔板上的小孔形成点光源进入凹面镜,经凹面镜反射后形成平行光束垂直经过实验拍摄流场,流场扰动所形成的明暗不均匀的像经刀口后成像于相机像面上,“Z”字型光路及刀口切光有助于削弱反射式纹影所带来的像差。相机使用Photron UX50高速彩色CCD,拍摄速度2 000帧/s时相机的最高分辨率为1 280×1 024,镜头为Nikon 80~200 mm长焦镜头。方形有机玻璃实验段的横截面积为120 mm×120 mm。采用Nikon 50 mm定焦微距镜头,高速彩色CCD相机与示波器同步触发,拍摄速度为10 000帧/s,记录等离子体点火器的放电及电弧发展过程。示波器为Tektronix公司的DPO4104B四通道数字示波器,通过Tektronix公司生产的电压、电流探针测量点火器工作时的电压、电流信号,电压探针型号为P6015A,电流探针型号为TCP0030。

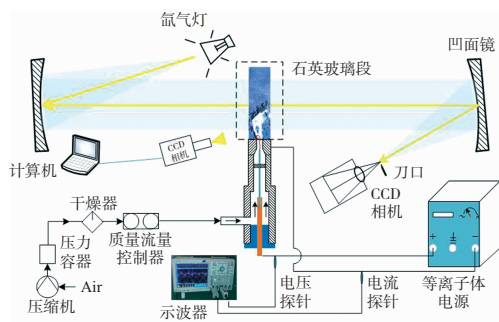


图1 等离子体射流纹影实验系统示意图

1.2 等离子体射流点火器设计

等离子体射流点火器的工作原理就是通过通过在阴阳两极间形成的高温电弧电离并加热通入点火器的空气工作介质,从而形成等离子体射流。基于此原理,本文设计的等离子体点火器进一步简化结构,缩小了点火器的体积尺寸,其结构如图2所示。本文所设计的等离子体射流点火器主要由以下几部分组成:阳极头部、阴极棒、旋流器、阴极安装座、绝缘套

以及不锈钢外壳。阳极头部和阴极棒为点火器的放电部件,均选用钨铜合金(钨 70%,铜 30%)材料,导电性好、能耐电流烧蚀,阴极棒安装在绝缘套内的安装座上,并通过旋流器固定,旋流角度 30° ,阴极棒尖端与阳极头部最窄处的距离为 1 mm。

点火器工作时内部通有空气工作介质,接通电源后,点火器的阴极与阳极间形成高电位差,并在其距离最短处击穿空气工作介质形成电弧,引弧成功后,电弧在空气工作介质的气动作用下逐渐拉长,最终电弧弧根落在阳极头部外表面,电弧拉长到一定程度时,电源功率无法维持其继续做功,电弧断裂,又进行下一次击穿放电,循环往复。

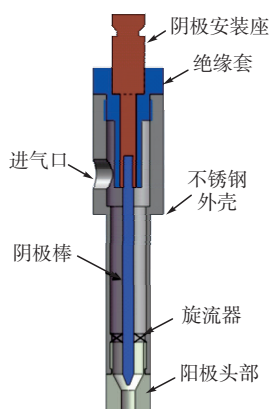


图 2 等离子体射流点火器结构示意图

1.3 实验方法与实验原理

本文采用控制变量法进行实验,保持空气工作介质流量、驱动电源输出电流等相关因素不变,研究来流环境下不同横向来流速度对航空等离子体点火器射流特性的影响规律。为保证实验的准确性和可靠性,进行实验之前先通气,待气流稳定以后再进行相关实验。

点火器做功时的功率是反映点火器性能的重要参数,在点火器放电过程中,电压电流波形是在震荡变化的,因此其功率不是一个稳定的值,也会随着电压电流的震荡而不断改变,可以通过 MATLAB 计算点火器做功的瞬时功率 P ,其定义为:

$$P = U_1 I_1 \quad (1)$$

式中: U_1 和 I_1 分别为点火器稳定工作时的瞬时电压和瞬时电流。

为保证点火器瞬时功率计算的准确性,相同工况下分别对电压和电流测量 5 次,取平均值之后再行瞬时功率的计算。点火器的功耗 W 是其瞬时功率 P 在时间尺度上的累加,其定义为:

$$W = \int_0^t P dt \quad (2)$$

式中: P 为点火器稳定工作时的瞬时功率。

利用纹影拍摄方法,对等离子体射流的动态过程进行拍摄,以分析等离子体射流特性的变化规律。纹影拍摄方法捕捉到的是流场中密度梯度的变化,等离子体射流以高温高速进入点火器外部流场,对外部流场产生剧烈卷吸和扰动,形成扰动边界,扰动边界内的流场面积定义为射流面积,根据湍流射流理论,温度为 T 、速度为 v 的射流流入外部流场,由于热量扩散比动量扩散要快,温度扰动的射流边界比速度扰动的射流边界要宽,但在处理实际问题时,可以忽略温度与速度扰动边界的微小差异,认为其边界是一致的^[16]。如图 3 所示,本文定义的射流参数如下:

射流穿透深度 L 指从等离子体点火器阳极喷口端面至射流顶端的垂直距离;

射流面积 S 指高温等离子体射流对外部流场的扰动区域面积;

射流速度 v_L 指相邻两帧纹影照片的射流贯穿深度的差值与帧时间的比值;

射流面积变化率 v_s 指相邻两帧纹影照片的射流面积的差值与帧时间的比值;

射流偏转角 θ 指射流边界两侧距离射流喷口中心线最远处的两点和喷口中心点的连线与中心线夹角 $\theta_2 - \theta_1$ 的差值。

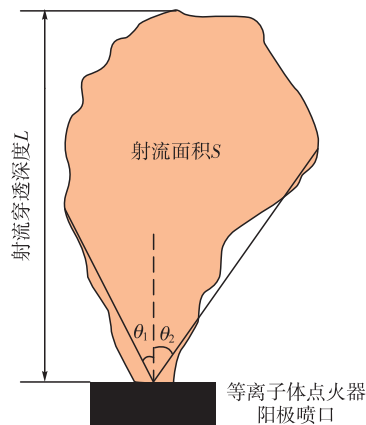


图 3 等离子体点火器射流参数示意图

2 结果与讨论

2.1 放电过程分析

本次实验采用高压起弧、大直流维持电弧的工作方式,在等离子体点火器驱动电源输出电流 $I =$

30 A、空气工作介质流量 $W_{\text{air}} = 45 \text{ L/min}$ 的条件下进行放电实验。图4为等离子体点火器放电过程电压、电流波形图,从波形图中可以看出等离子体点火器的放电过程是一个周期性的过程,刚开始电压维持在一个定值附近震荡,电流为零,一段时间后达到击穿条件,点火器的阴极阳极最窄处的空气工作介质被击穿,电弧形成,这时电压瞬间达到几千伏后又迅速回落,电流有一个陡升过程,电弧形成后在气动力的作用下开始运动被拉长,电压值随着电弧的逐渐拉长不断增高,当电弧拉长到一定程度时,电源功率不足以维持电弧放电,电弧断裂,电压重新回到开始值附近震荡,电流变为零。基于上述特点,本文将

等离子体点火器的放电过程分为3个阶段:击穿过程、电弧维持过程、储能过程。图5为一个放电周期内电弧形成到断裂的运动发展过程。

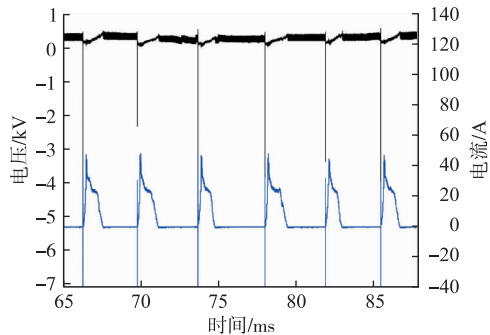


图4 等离子体点火器放电过程的电压、电流波形图

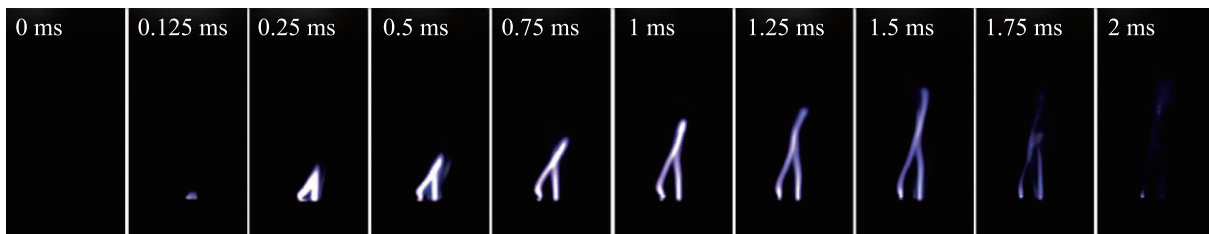


图5 等离子体点火器的放电电弧运动发展图

图6是点火器放电过程中若干个放电周期内的瞬时功率 P 与功耗 W 的波形图,图中可以看出,瞬时功率的变化特点和放电过程是对应的,在储能阶段,电流为零,瞬时功率保持为零,击穿瞬间瞬时功率会有一个突增过程,在电弧维持阶段,瞬时功率随着电压电流的变化而不断变化,维持阶段的瞬时功率达 $5 \sim 6 \text{ kW}$,电弧做功剧烈。从功耗图中可以看出,电弧做功为阶梯累积形式,这与点火器的周期性放电过程相对应,单独考虑电弧维持过程的瞬时功耗如图6所示,功耗在电弧维持过程是线性增加的,递增的斜率就是电弧维持过程的平均功率,在电弧维持阶段平均功率达 $3 \sim 4 \text{ kW}$ 。

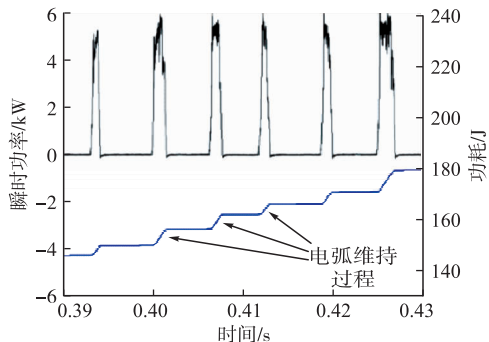


图6 等离子体点火器放电过程的瞬时功率与功耗波形图

2.2 横向来流速度对等离子体射流偏转角的影响

等离子体点火器工作在燃烧室内部,燃烧室内部的复杂流场对等离子体点火器的工作特性会带来一定影响,为了研究来流条件下,不同横向来流速度对等离子体点火器射流特性的影响,保持点火器的空气工作介质流量 $W_{\text{air}} = 45 \text{ L/min}$ 、驱动电源输出电流 $I = 30 \text{ A}$ 不变,改变横向来流速度 v_m ,使其与发动机燃烧室点火器位置处平均流速接近,分别为 5 m/s 、 10 m/s 、 15 m/s 、 20 m/s ,拍摄记录各个工况下的射流发展纹影图,见图7。

在来流环境下,等离子体点火器的射流过程和射流形态与静止环境下有很大不同,当有横向来流时,从点火器喷出的等离子体射流会与横向来流发生强烈的剪切作用,在剪切力的作用下,等离子体射流会朝着横向来流的流动方向偏转。如图7所示,在等离子体射流形成初期,电弧存在于点火器阳极喷口外部,起到点火作用,此时由于电弧的存在,不同横向来流速度下射流偏转角度均较小;随着等离子体射流的发展,等离子体射流不断深入横向来流,射流偏转角逐渐变大,当电弧断裂消失后,等离子体射流开始耗散,待等离子体点火器重新击穿引弧后进入下一个射流发展过程。

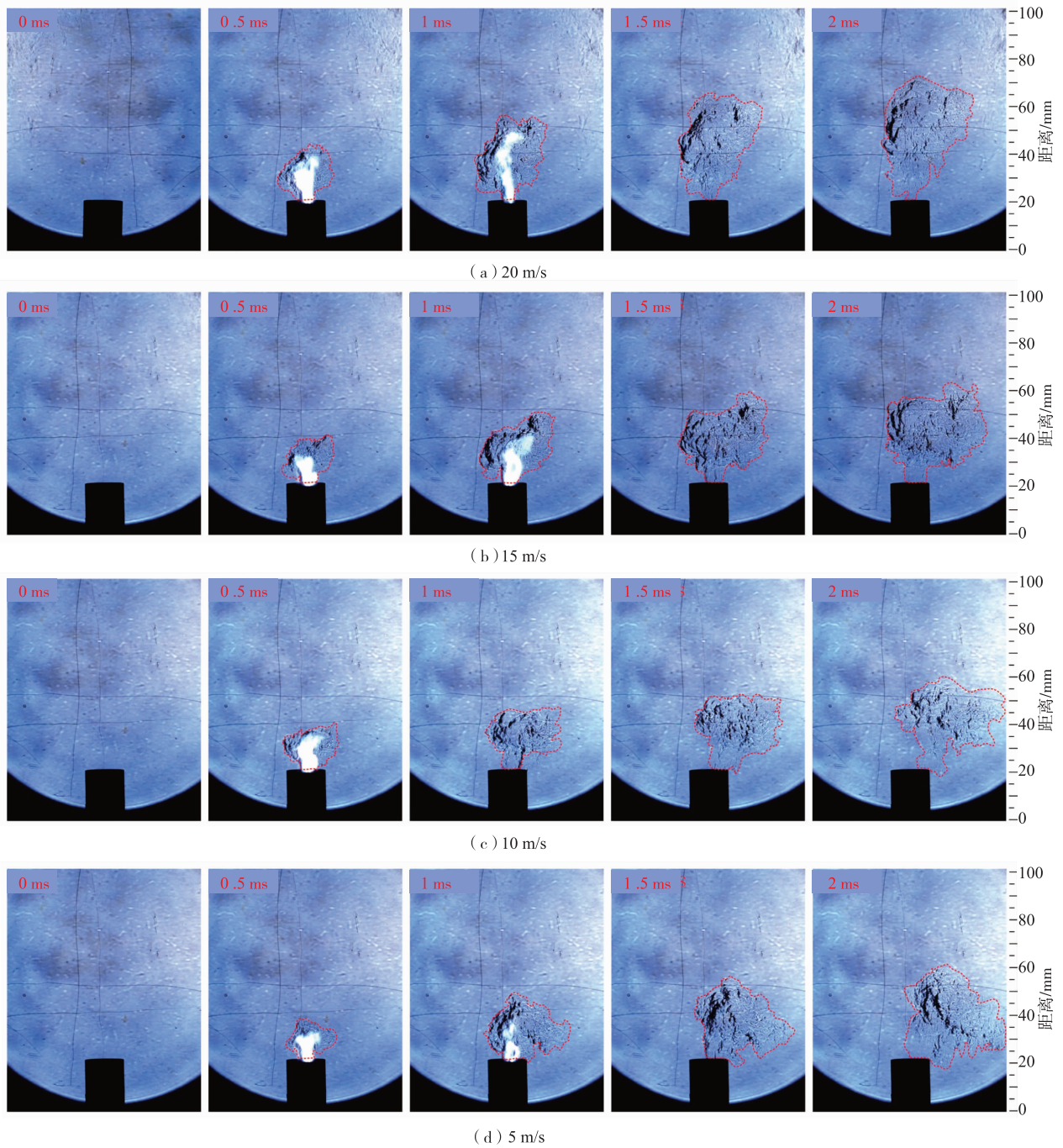


图 7 不同横向来流速度下等离子体射流的发展过程纹影图

不同横向来流速度下等离子体射流偏转角的变化如图 8 所示。射流偏转角 θ 随着来流速度的增大不断增大,当横向来流速度 $v_m=5 \text{ m/s}$ 时,射流偏转角 $\theta=15.9^\circ$,当横向来流速度 $v_m=20 \text{ m/s}$ 时,射流偏转角 $\theta=77.1^\circ$,来流速度增大 15 m/s 射流偏转角增大 3.8 倍。这说明在驱动电源输出电流与空气工作介质流量均不变的情况下,横向来流速度的增大会减弱等离子体射流的穿透力,来流速度越大,射流偏转程度越大,穿透力越差。

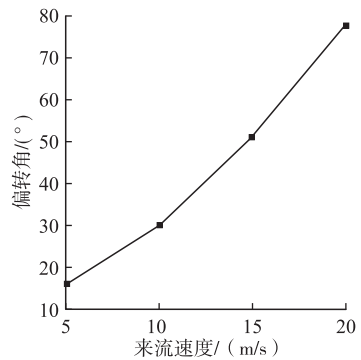


图 8 不同横向来流速度下等离子体射流偏转角的变化

2.3 横向来流速度对等离子体射流穿透深度和射流速度的影响

不同横向来流速度下等离子体射流穿透深度随着时间的变化如图9所示。从图中可以明显看出,随着时间的增长等离子体射流的穿透深度不断增大,横向来流速度越大,射流穿透深度越小,在射流拍摄初始时刻 $t=0.5$ ms 时,横向来流速度 $v_m=5$ m/s 的射流穿透深度 $L=2.19$ cm,横向来流速度 $v_m=20$ m/s 的射流穿透深度 $L=1.75$ cm,到 $t=2$ ms 时,横向来流速度 $v_m=5$ m/s 的射流穿透深度 $L=4.99$ cm, $v_m=20$ m/s 的射流穿透深度 $L=3.94$ cm,随着时间的增长,小来流速度与大来流速度下等离子体点火器射流穿透深度的差距不断增大,到 $t=2$ ms 时, $v_m=20$ m/s 比 $v_m=5$ m/s 时射流穿透深度同比减小了 21.0%。一方面,来流速度的增大,加大了射流与来流之间动量和热量的交换速率,来流对射流的冷却作用增强,阻力变大,使得射流穿透深度随来流速度的增大不断减小;另一方面,来流速度增大会使得射流偏转角增大,射流穿透深度减小。

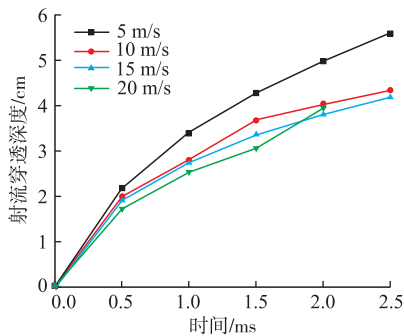


图9 不同横向来流速度下等离子体射流穿透深度随时间的变化

不同横向来流速度下等离子体射流速度随着时间的变化如图10所示。由图可知,等离子体射流速度在拍摄初始时刻 $t=0.5$ ms 达到最高,横向来流速度越低,拍摄初始时刻的射流速度越大, $v_m=5$ m/s 时的射流速度 $v_{L,max}=43.8$ m/s, $v_m=20$ m/s 时的射流速度 $v_{L,max}=35.0$ m/s,之后在横向来流剪切力与冷却作用下,射流速度随着时间的增长不断减小。

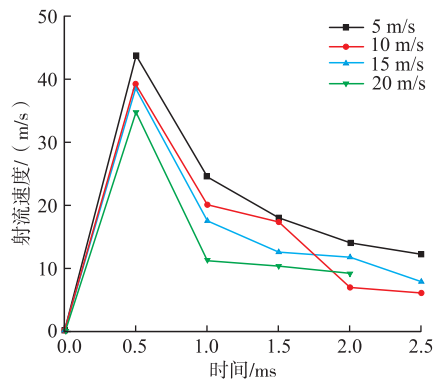


图10 不同横向来流速度下等离子体射流速度随时间的变化

2.4 横向来流速度对等离子体射流面积和面积变化率的影响

不同横向来流速度下等离子体射流面积随着时间的变化如图11所示。可以看出,等离子体射流面积随着时间的增长不断增大,并且横向来流速度越大,射流面积越小, $t=2.0$ ms 时,来流速度 $v_m=5$ m/s 射流面积 $S=10.3$ cm²,来流速度 $v_m=20$ m/s,射流面积 $S=7.3$ cm²,同比减小 29.1%。这是因为横向来流速度越大时,来流与射流之间的热交换与动量质量交换速率加快,射流动量与热量损失加大,减小射流的能量,使得射流的膨胀速度降低,射流面积减小。

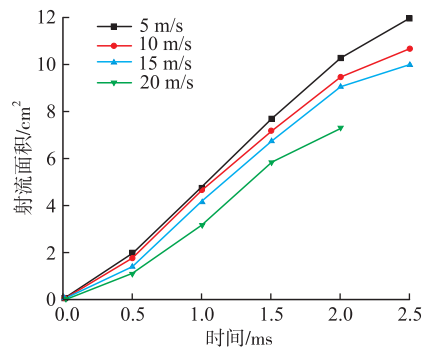


图11 不同横向来流速度下等离子体射流面积随时间的变化

不同横向来流速度下等离子体射流面积变化率随着时间的变化如图12所示。从图中可以看出,射流面积变化率随着时间的增长先增大后减小,并且随着横向来流速度的增大,射流面积变化率不断减小, $t=1.5$ ms 时,来流速度 $v_m=5$ m/s 的射流面积变化率达到最大, $v_{S,max}=23.4$ cm²/s,此时 $v_m=20$ m/s 下的射流面积变化率 $v_{S,max}=20.9$ cm²/s,减小了 10.7%。

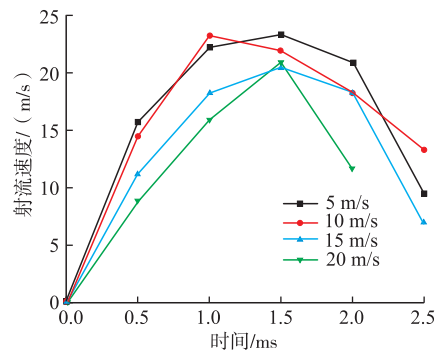


图12 不同横向来流速度下等离子体射流面积变化率随时间的变化

3 结论

本文在不同的横向来流速度条件下通过对自行设计的等离子体射流点火器进行实验和测量,得到

以下结论:

1) 等离子体点火器的放电过程分为3个阶段:击穿过程、电弧维持过程、储能过程;瞬时功率的变化过程与放电过程是相对应的,在储能阶段,电流为零,瞬时功率保持为零,击穿瞬间瞬时功率会有一个突增过程,在电弧维持阶段,瞬时功率随着电压电流的变化而不断变化,维持阶段的瞬时功率达5~6 kW,电弧做功剧烈。

2) 在等离子体射流形成初期,由于电弧存在于阳极喷口的外侧,不同横向来流速度下射流偏转角度均较小;随着等离子体射流的发展,射流不断深入横向来流,偏转角度越来越大;射流偏转角 θ 随着来流速度的增大不断增大,当横向来流速度 $v_m=5$ m/s时,射流偏转角 $\theta=15.9^\circ$,当横向来流速度 $v_m=20$ m/s时,射流偏转角 $\theta=77.1^\circ$,来流速度增大15 m/s射流偏转角增大3.8倍。

3) 来流速度的增大增加了射流与来流之间动量和热量的交换效率,使得射流深入来流时阻力变大;随着时间的增长,等离子体射流的穿透深度越来越大,射流速度先增大后减小;随着来流速度的增长,等离子体射流的穿透深度和射流速度均越来越小。

4) 来流和射流之间的热交换和动量质量交换,使得射流的热量和动量损失加大,射流能量降低,膨胀速度降低;随着时间的增长,等离子体射流面积逐渐增大,射流面积变化率先增大后减小;随着来流速度的增长,等离子体射流面积和射流面积变化率均越来越小。

参考文献

- [1] 李继保,刘大响.局部富油供油扩展燃烧室贫油点火熄火边界研究[J].航空动力学报,2003,18(2):221-224.
- [2] LEFEBVRE A, BALLAL D. Gas Turbine Combustion: Alternative Fuels and Emissions[M]. [S. l.]: CRC Press, 2010.
- [3] 赵青,刘述章,童洪辉.等离子体技术及应用[M].北京:国防工业出版社,2009:1-3.
- [4] JU Y, SUN W. Plasma Assisted Combustion: Dynamics and Chemistry[J]. Progress in Energy & Combustion Science, 2015, 48(3):21-83.
- [5] 何立明,刘兴建,赵兵兵,等.等离子体强化燃烧的目前研究进展[J].航空动力学报,2016,31(7):1537-1551.
- [6] 冀光,张文平,穆勇,等.燃气轮机等离子点火系统实验研究[J].燃气轮机技术,2006,19(2):49-53.
- [7] 陈梦,窦志国,席文雄.激光诱导等离子体点火方法研究进展[J].激光与光电子学进展,2018,55(3):110-118.
- [8] SINIBALDI J, RODRIGUEZ J, CHANNEL B, et al. Investigation of Transient Plasma Ignition For Pulse Detonation Engines [C]// The 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. [S. l.]: AIAA, 2005: 3774.
- [9] STARIKOVSKAIA S M. Plasma Assisted Ignition and Combustion[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2006, 39(16): R265.
- [10] CATHEY C, CAIN J, WANG H, et al. OH Production by Transient Plasma and Mechanism of Flame Ignition and Propagation in Quiescent Methane-Air Mixtures[J]. Combustion & Flame, 2008, 154(4): 715-727.
- [11] CHOE M S, LEE K T, KIM K S, et al. Effect of the Plasma Jet Ignition and Flame Kernel Under The Combustion Process in a Constant Volume Combustion Chamber [J]. International Journal of Automotive Technology, 2020, 21(4): 833-842.
- [12] WALSH J L, KONG M G. Ignition and Propagation of an Atmospheric-Pressure Helium Plasma Jet [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(11): 2306-2307.
- [13] 唐井峰,向安定,李寄,等.等离子体射流作用下光壁面超声速燃烧室点火试验研究[J/OL].推进技术:1-7 [2020-12-26]. <https://doi.org/10.13675/j.cnki.tjjs.190878>.
- [14] 黄丹青,于锦禄,王思博,等.预燃式等离子体射流点火器工作特性实验研究[J].高压电技术,2018,44(9):3068-3075.
- [15] 何立明,陈高成,赵兵兵,等.等离子体射流点火的动力学机理分析[J].高电压技术,2018,44(3):856-863.
- [16] 谢象春.湍流射流理论与计算[M].北京:科学出版社,1975:102-109.

(编辑:姚树峰)